

VYSOKÁ ŠKOLA BÁŇSKÁ – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA
STAVEBNÍ FAKULTA
KATEDRA GEOTECHNIKY A PODZEMNÍHO STAVITELSTVÍ

Geotechnický odkaz monumentálních historických geotechnických sypaných
a zděných staveb a konstrukcí
Geotechnical Legacy of the Monumental Historical Geotechnical Earth
and Masonry Works

Student:

Daniel Benada

Vedoucí bakalářské práce:

doc. Ing. Karel Vojtasík, CSc.

Ostrava 2016

Zadání bakalářské práce

Student: **Daniel Benada**
Studijní program: B3607 Stavební inženýrství
Studijní obor: 3647R017 Geotechnika
Téma: Geotechnický odkaz monumentálních historických geotechnických sypaných a zděných staveb a konstrukcí
Geotechnical Legacy of the Monumental Historical Geotechnical Earth and Masonry Works

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Úvod
2. Přehled zachovaných geotechnických sypaných a zděných staveb
3. Rozbor konstručních a geotechnických okolností staveb
4. Poučení současným a budoucím geotechnickým stavbám
5. Příklady analogických minulých a současných staveb
6. Závěr

Seznam doporučené odborné literatury:

Pašek, Matula a kolektiv. *Inženýrská geologie I., II. - Technický Průvodce č. 76*. Praha : Česká Matice Technická, 1995
Osmanagich. *Pyramids Around The World*. The New Era Times Press, 2012

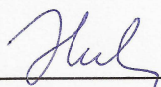
Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

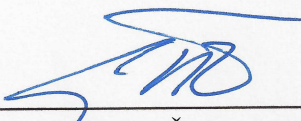
Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Karel Vojtasík, CSc.**

Datum zadání: 30.10.2015

Datum odevzdání: 02.05.2016




doc. RNDr. Eva Hrubešová, Ph.D.
vedoucí katedry


prof. Ing. Radim Čajka, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci, včetně všech příloh, vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě

.....

podpis studenta

Prohlašuji:

- Byl jsem seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- Beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- Souhlasím s tím, že údaje o bakalářské práci budou zveřejněny v informačním systému VŠBTUO.
- Bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- Bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- Beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě

Anotace

BENADA, Daniel. Geotechnický odkaz monumentálních historických geotechnických sypaných a zděných staveb a konstrukcí. Ostrava: VŠB-TUO, 2016. 39 s.

Bakalářská práce podává výčet několika známých zachovalých historických geotechnických monumentálních zděných a sypaných staveb, které dokumentují vysokou technickou úroveň jejich stavitelů a mohou být zdrojem poučení a vzorem současným stavitelům geotechnických staveb. Jednotlivé kapitoly práce věnují pozornost a rozebírají geotechnické a konstrukční okolnosti včetně rozboru technologie výstavby těchto staveb. Následně se zabývá odkazem těchto zachovalých staveb pro stavby nové, ať už se jedná o poučení z negativních zkušeností, nebo pozitivních zkušeností, což je hlavním cílem tohoto tématu. V poslední části práce uvádí několik příkladů srovnání analogických historických staveb a novodobých staveb, popřípadě srovnání téže technologie užitě na historické a novodobé stavbě.

Klíčová slova: geotechnická stavba, historická stavba, monumentální stavba

Abstract

BENADA, Daniel. Geotechnical Legacy of the Monumental Historical Geotechnical Earth and Masonry Works. Ostrava: VŠB-TUO, 2016. 39 p.

The bachelor thesis provides a list of several known preserved geotechnical historical monumental masonry and earth structures, which document high technical level of their builders and can be a source of knowledge and model for builders of current geotechnical structures. Individual chapters pay attention and analyze geotechnical and structural factors, including an analysis of the technology of construction of these buildings. Subsequently we deal with the legacy of these preserved buildings for new construction, whether it is the lessons from negative experiences or positive experiences, which is the main objective of this theme. The last part gives several examples of comparison of analogous historic buildings and modern structures, or the comparison of the same technology used for historical and new construction.

Keywords: geotechnical structure, historic structure, monumental structure

Obsah

1	Úvod.....	2
2	Přehled zachovalých geotechnických sypaných a zděných staveb	3
2.1	Kultovní stavby – astronomické observatoře	5
2.2	Obranné stavby	8
2.3	Vodohospodářské stavby	9
3	Rozbor konstrukčních a geotechnických okolností staveb	11
3.1	Velká čínská zeď	11
3.2	Sadd el-Kafara	14
3.3	Monks Mound.....	16
3.4	Lomená pyramida	22
4	Poučení současným a budoucím geotechnickým stavbám.....	24
5	Příklady analogických minulých a současných staveb	25
5.1	Pěchování zeminy: Velká čínská zeď – Nk'Mip pouštní kulturní centrum.....	25
5.2	Akvadukty: Gadarský akvadukt – Thirlmerský Akvadukt.....	32
6	Závěr.....	37
8	Seznam použitých pramenů	38

1 Úvod

Tématem a cílem bakalářské práce je shrnutí faktů o dodnes zachovalých geotechnických stavbách a následná analýza konstrukčních a geotechnických okolností těchto vybraných objektů. Tyto zvolené stavby dokumentují vysokou konstrukční, technickou a logistickou úroveň společnosti, která uvedené stavby, jež se dochovaly až do současnosti, vybudovala. V těchto stavbách jsou zhmotněny dobové poznatky, prověřené staletími, které představují cenné informace uplatnitelné i pro současné a budoucí geotechnické stavby.

V současné době se staví stále vyšší, prostorově rozsáhlejší a těžší stavby, což platí i pro stavby geotechnické, přičemž se dá předpokládat, že tento trend bude i v budoucnu pokračovat. Je však zbytečné snažit se vymyslet nový postup, technologii nebo konstrukci, když zde máme stavby, ze kterých se dané informace dají vyčíst a aplikovat pro výstavbu nového objektu. Cílem této práce je takové použitelné informace najít, zhodnotit a dokázat, že jsou vhodným podkladem pro použití ve výstavbě staveb nových.

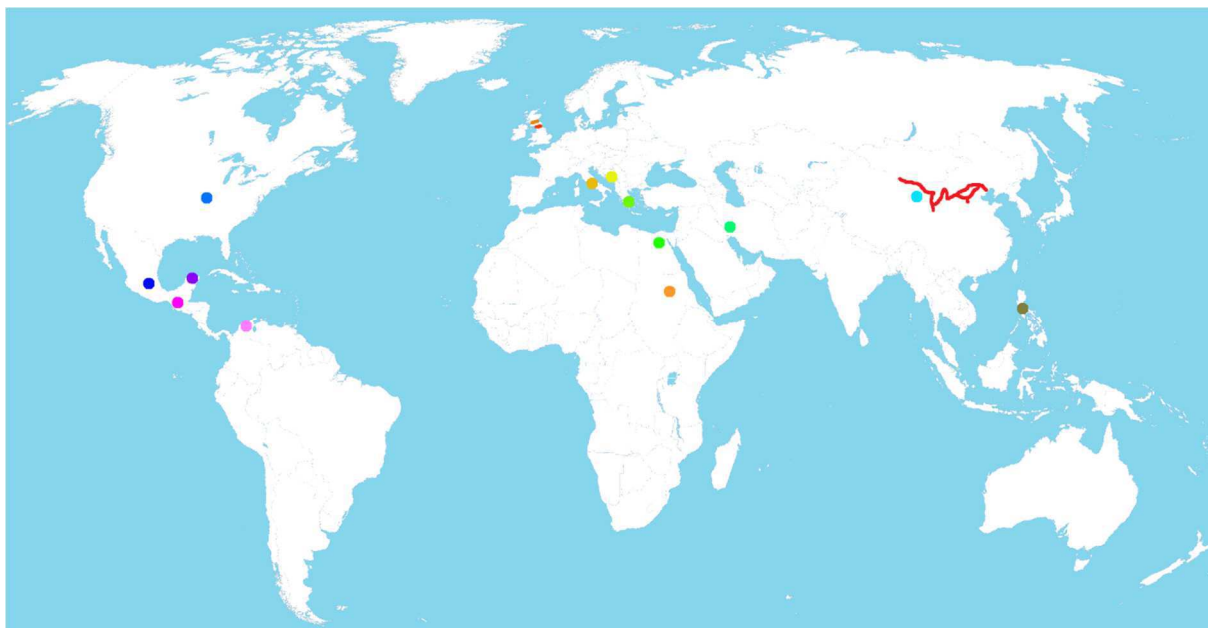
Bakalářská práce je rozdělena do pěti základních částí, včetně prvního úvodu, přičemž druhá rozděluje a vyjmenovává některé významné zachovalé geotechnické stavby, třetí část do hloubky rozebírá vybrané zachovalé geotechnické stavby z hlediska konstrukčních a geotechnických okolností, ve čtvrté části jsou vysloveny poučení novým stavbám vyplývající z informací uvedených v předchozích kapitolách a v páté kapitole je provedeno srovnání historických staveb s analogickými moderními stavbami, popřípadě srovnání stejné technologie použité na historické stavbě a na moderní stavbě.

2 Přehled zachovalých geotechnických sypaných a zděných staveb

Geotechnická stavba je objekt realizovaný v horninovém prostředí, nebo z hornin zhotovený. Horninové prostředí, popřípadě hornina, z které je daná stavba vytvořena, je determinujícím činitelem, kterému jsou ostatní konstrukční okolnosti podřízeny. Objektivní přírodní struktury a materiály činí z geotechnických staveb jedinečné a neopakovatelné objekty. Výstavbu geotechnických staveb lze považovat za exogenní antropogenní proces, který ve stále rostoucí míře přispívá k vývoji povrchu planety země. Historické geotechnické stavby jsou však zachovány hlavně po mocných civilizacích, které si výstavbu těchto velkých objektů mohly dovolit. Konstrukce stavby tak velkých rozměrů si totiž žádá spolupráci velkého množství pracovníků, mnohdy trvající dlouhá léta, dekády, či dokonce staletí (Čína, Řím, Egypt, říše původních obyvatel Ameriky atd.).

Projekty či jiné důkazy o předem promyšleném postupu výstavby bohužel zpravidla nebyly dochovány, nicméně například při pohledu na egyptské pyramidy musí být každému jasné, že se nejedná o stavby postavené bez kvalitního předchozího rozmyslu a plánu. Na mnohých historických geotechnických stavbách se však už projevil zub času v podobě eroze, sesunutí svahů (pokud se jedná o sypané stavby) a povětrnostních vlivů, popřípadě byly stavby rozebírány za účelem hledání pokladů, či pro využití kamenných kvádrů jako stavební materiál pro nové stavby (v případě staveb zděných), nicméně trvanlivost staveb, které se dodnes dochovaly je udivující a při výstavbě moderních objektů bychom se měli pokusit tento úspěch napodobit.

Historické geotechnické stavby můžeme rozdělit podle účelu do tří kategorií: kultovní – astronomické observatoře, obranné a vodohospodářské.



Obrázek 1: Znázornění polohy níže uvedených staveb na mapě Světa

- Velká Chufuova pyramida, Červená pyramida, Lomená pyramida, Stupňovitá pyramida, Sadd el-Kafara (Egypt)
- Pyramida Slunce a Pyramida Měsíce (Spojené státy Mexické)
- Chogha Zanbil (Írán)
- Monks Mound (Illinois, USA)
- El Castillo (Spojené státy Mexické)
- La Danta (Guatemala)
- Núbijské pyramidy (Súdán)
- Cestiova pyramida (Itálie)
- Western Xia tombs (Čínská lidová republika)
- Pyramidové hory u městečka Visoko (Bosna a Hercegovina)
- Velká čínská zeď (Čínská lidová republika)
- Hadriánův val (Velká Británie)
- Antoninův val (Velká Británie)
- Obranná zeď v Cartagena (Kolumbie)
- Přehrada Alysia (Řecko)
- Rýžové terasy v Banaue (Filipíny)

2.1 Kultovní stavby – astronomické observatoře

Geotechnických sypaných a zděných se zachovalo po celém světě značné množství, převážně se jedná o stavby kultovní, tedy stavby velkého významu pro kulturu, která je vystavěla. Pravý význam výstavby těchto obrovských staveb bývá často nejasný, většinou se však jedná o astronomické observatoře, stavby pro demonstraci nadřazenosti jednotlivce nebo velikosti společnosti, či sakrální a pohřební stavby. Zděné kultovní stavby naznačují, že jejich stavitelé museli zvládat vysokou geometrii, fyziku a stavitelství samotné. Oproti tomu sypané kultovní stavby jsou pouze jednoduše navršená kvanta materiálu. Nedá se však říci, že by tyto stavby sloužily blahobytu širokému spektru lidí v okolí, ale spíše vybraným jednotlivcům, popřípadě úzkému kruhu jednotlivců. Mezi takové stavby nepatří jen notoricky známé pyramidy v Egyptě (**Velká Chufuova pyramida, Červená pyramida, Lomená pyramida, Stupňovitá pyramida** (2700-2500 př. n. l.) atd.) a **Pyramida Slunce s Pyramidou Měsíce** ve Spojených státech Mexických (100 n. l.), ale i jiné, méně známé kultovní stavby:

Chogha Zanbil (Írán) – zděný zikkurat, jehož jádro je tvořeno z hliněných sušených cihel, které jsou chráněny 2 m silným pláštěm z plných pálených cihel, je jedním z mála zikkuratů mimo území bývalé Mezopotámie. Dochovaly se pouze 2 z původních 5 stupňů zikkuratu (cca 1250 př. n. l.) (obr. 2).



Obrázek 2: Zikkurat Chogha Zanbil

Monks Mound (Illinois, USA) - stavba, která je považovaná za největší stavbu zemních prací před-kolumbijské doby na území Ameriky a největší pyramidu na sever od střední Ameriky vůbec (900 n. l.) - viz. kapitola 3.3.

El Castillo (Spojené státy mexické) – zděná stupňovitá pyramida s důmyslnou hrou světla a stínu, která přesně ve dny jarní a podzimní rovnodennosti vytváří na schodech iluzi hada s kamennou hlavou při patě pyramidy, což dokazuje, že stavitelé této stavby disponovali velkými znalostmi astronomie a geometrie (cca 1000 n. l.).

La Danta (Guatemala) - zděná stupňovitá pyramida, jejíž výška 70 m z ní dělá nejvyšší pyramidu vystavěnou národem Májů.

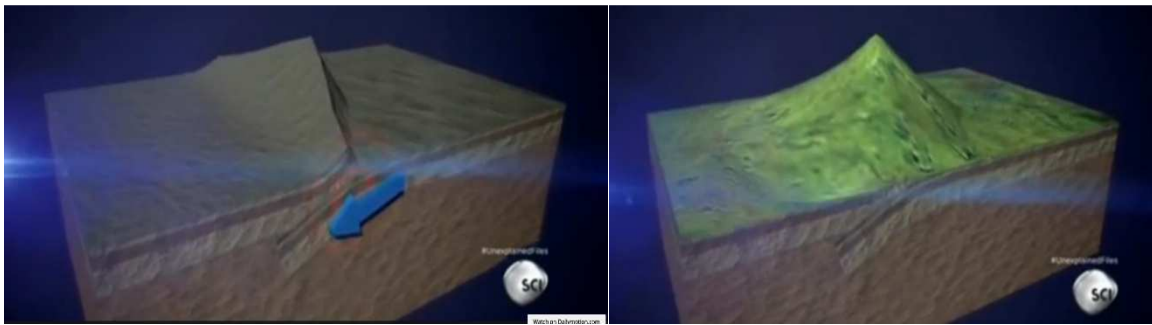
Núbijské pyramidy (Súdán) – přibližně 255 zděných pyramid, které jsou oproti egyptským pyramidám, kterými byly ovlivněny, nižší (výšky cca 6 – 30 m), avšak jejich sklon se pohybuje okolo 70°, přičemž egyptské pyramidy mají sklon mezi 40° a 50° (cca 1700 př. n. l.).

Cestiova pyramida (Itálie) – dokonale zachovalá (díky tomu, že byla začleněna do městského opevnění) pravá pyramida vystavěna z betonu a následně obložena deskami z bílého mramoru (18-12 př. n. l.).

Western Xia tombs (Čínská lidová republika) – na území okolo 50 km² se rozkládá areál s 9 císařskými a 250 mausoley císařských příbuzných a vysokých hodnostářů, tvořených vysokými hliněnými násypy (1100-1300 n. l.).

Na území Egypta je až 120 pyramid, avšak pravým pyramidovým královstvím je Jižní Amerika a Střední Amerika. Na mexickém poloostrově Yucatán je několik stovek plochých terasových pyramid. Na území džunglí v Guatemale je téměř jedno sto starověkých měst již objevených, avšak nijak důkladně neprobádaných a neprozkoumaných. V každém již objeveném takovém starověkém městě jsou přítomny pyramidy, například jen v El Mirador – starověkém májském městě, je více než 30 pyramid různých velikostí, kde největší a nejvyšší je La Danta. Očekává se, že další starověká města budou v hluboké džungli ještě v budoucnu objeveny.

V roce 2006 se po objevení kopců nápadně podobných pyramidám nedaleko města Visoko v Bosně a Hercegovině velmi často začal používat pojem “pyramidová hora“ (“pyramid hill”). Toto označení znamená, že ještě nebylo vědci jednoznačně prokázáno, jestli se jedná o člověkem vytvořenou stavbu, či je tento nápadný kopec vytvořen samotnou přírodou (podsouváním geologických vrstev pod sousední geologické vrstvy, které jsou tímto procesem vyzvedány a následně zerodovány působením lokálních povětrnostních podmínek – obr. 3).



Obrázek 3: Znázornění možného vzniku pyramidových hor

Jsou vysloveny hypotézy, že tyto pyramidy byly postaveny zhruba 10 000 let př. n. l. (tedy v období kdy se tehdejší člověk živil lovem a sběrem potravy a nejsou žádné důkazy o tom, že by si vytvářel trvalá obydlí), nebo dokonce že se jedná o starobylou elektromagnetickou elektrárnu. Po nálezů v Bosně a Hercegovině (zastánci teorie o tom, že v Bosně byly pyramidy skutečně postaveny člověkem, hlavně tedy jejich “objevitel“ archeolog Dr. Sam Semir Osmanagich, Ph.D, je pojmenovali Pyramida Slunce - obr. 4, Pyramida Měsíce, Pyramida Draka, Pyramida Matky Země a Pyramida Lásky) byly pyramidové hory objeveny i na území Itálie (Santa Agata dei Goti), Slovinska (pyramidová hora u města Maribor), Austrálie (Pyramida Gympie) a Ruska (pyramidové dvojčata v městě Nakhodka).



Obrázek 4: “Pyramida Slunce“ v Bosně a Hercegovině

2.2 Obranné stavby

Zachovalých obranných staveb není takové množství, jako staveb kultovních, avšak jejich rozsah a proporce jsou dodnes úctyhodné. Jedná se výhradně o stavby líniové, tedy stavby, jejichž jeden rozměr převládá nad ostatními dvěma. Materiál z kterého jsou stavby vyrobeny se po jejich délce může měnit dle lokálních možností a zdrojů, popřípadě s vývojem technologií civilizace, která je vystavěla (mnohdy totiž výstavba trvala stovky až tisíce let). Obranné stavby, jak už naznačuje jejich název, sloužily k obraně jedné kultury, společnosti nebo národa před druhou skupinou - útočící. Hlavním a nejznámějším zástupcem této kategorie geotechnických staveb je **Velká čínská zeď** – obr. 5, jejíž výstavba začala cca roku 685 př. n. l. a trvala přes 2000 let.



Obrázek 5: Velká čínská zeď

Dalšími zástupci staveb obranných jsou:

Walls of Benin (Nigérie) – je opevnění tvořené hliněnou zdí a vodními příkopy jejichž délka byla větší než 16 000 km. Mnohými je tato líniová stavby považována za nejdelší stavbu na světě (800-1500 n. l.). Co z této obranné konstrukce zbylo však je dnes strháváno kvůli rozvoji obchodu s nemovitostmi.

Hadriánův val (Velká Británie) – 3 m široká, 5-6 m vysoká a 117,5 km dlouhá obranná kamenná zeď Římské říše vedoucí od západního k východnímu pobřeží dnešní Velké Británie (122-128 n. l.).

Antoninův val (Velká Británie) – severnější, 63 km dlouhá obdoba Hadriánova valu, která měla být také celo-kamenná, avšak tento koncept byl pozměněn na zeď tvořenou kamenným základem, pokrytým vysokou vrstvou drnů a rašeliny (142-154 n. l.).

Obranná zeď v Cartagena (Kolumbie) – okolo 11 km dlouhá obranná kamenná zeď okolo celého města zbudovaná na ochranu proti pirátům.

2.3 Vodohospodářské stavby

Stavby vodohospodářské mnohdy demonstrují, jak mistrně dokázali dávné civilizace nakládat s vodou, která není ve všech koutech světa dodnes samozřejmostí. Hospodaření s vodou, její uchovávání a transport je dovednost, v které by se moderní společnost mohla inspirovat například od národu Nabatijců, kteří žili ve skalním městě **Petra**, na území dnešního Jordánska.

Jedním z mála do dnes svou funkci plnícím vodohospodářským dílem je **Cloaca maxima** – odpadní stoka, která vede pod hlavním městem Itálie, Římem, přičemž její realizace se datuje zhruba na rok 600 př. n. l..

Další vodohospodářské stavby jsou například:

Rýžové terasy v Banaue (Filipíny) – jsou stále obdělávány a rekonstruovány místními zemědělci, bývají označovány za osmý div světa (cca 2000 let staré) (obr. 6).



Obrázek 6: Rýžové terasy v Banaue

Sadd el-Kafara (Egypt) – nejstarší známá přehrada, tedy první pokus o zadržení vody ve velkém měřítku (2650 př. n. l.) - viz. kapitola 3.2.

Přehrada Alysia (Řecko) – dodnes funkční, kamenem zděná přehrada s inteligentním využitím ve skále vysekaného postranního přelivu.

V horninovém masivu skryté části akvaduktů římského impéria – například **Acqua Vergine** (19 př. n. l.), **Aqua Virgo** (19 př. n. l.) **Aqua Augusta** (30-20 př. n. l.) a **Aqua Claudia** (38-52 n. l.), nebo nejdelší starověký kanát **Gadarský akvadukt** (210 n. l.) – viz. kapitola 5.2.

3 Rozbor konstrukčních a geotechnických okolností staveb

Tato kapitola se zabývá konstrukčními a geotechnickými okolnostmi výstavby jednotlivých objektů, ale také na chybami, které byly provedeny buď ve fázi návrhu, nebo ve fázi výstavby konstrukce, popřípadě na následným přístupem k řešení vzniklých problémů.

3.1 *Velká čínská zeď*

Díky tomu, že výstavba této líniové stavby, tedy skupiny líniových staveb (protože se nejedná o jednu jedinou spojitou konstrukci), trvala přes 2000 let, je dobře zřejmá evoluce použitých technologií. Stavitelé inteligentně využívali přirozený terén k tomu, aby zvýšili účinnost samotné obranné zdi. Niveleta zdi byla vedena nejvyššími místy krajiny, aby dobytí či překonání této stavby bylo co nejobtížnější (obr. 5). Zděná část Velké čínské zdi je notoricky známá stavba, ale tato forma zdi je pouze posledním stádiem dlouhého vývoje, který jí předcházela.

V drtivé většině případů se stavitelé zdi snažili využívat a využívali lokální zdroje, namísto transportu materiálu z velkých vzdáleností, z čehož vychází jednotlivé použité technologie, které lze rozdělit do tří skupin: přechování zeminy popř. vyztužení zeminy vegetační hmotou, zdivo z neopracovaných kamenů kladených na sucho a zdivo z pálených cihel nebo kamenných bloků kladených do malty.

Technika přechování zeminy, vyztužování vegetační hmotou

Ranná forma zdi byla zkonstruována hlavně z upěchované zeminy. Ačkoliv to zní, jako nespolehlivé řešení obranné konstrukce, byly tyto zdi překvapivě pevné (tato technologie byla první technologií výstavby čínské zdi a i po dokončení posledních částí, zhruba 2000 let poté, byly první části stále využívány, přičemž fragmenty existují dodnes, navzdory miléníím eroze a nepříznivých povětrnostních podmínek).

Technice pěchované zeminy tamnější lidé říkají „Hangtu“ a její podstatou je nasypání zeminy¹ a menších kamenů po cca 20 cm tlustých vrstvách do dřevěného rozebiratelného bednění² na předem z velkých kamenů vyskládaný základ. Vrstvy zeminy jsou následně jednotlivě upěchovány pomocí ručních nástrojů (obr. 7). Tímto upěchováním se dosáhne kvalitního zhutnění a vrstva se ztenčí až na zhruba 13 cm. Celý proces se opakuje tak dlouho, dokud se nedosáhne požadované výšky konstrukce (většinou okolo 6 m) [1].



Obrázek 7: Znázornění techniky pěchování zeminy

Tato technologie je nevhodná v mírných a vlhkých oblastech, právě proto byla hojně využívána v oblastech suchých a je dodnes využívána čínskými farmáři při stavbě jejich obydlí. V současnosti zažívá tato technologie známa cca od roku 5000 př. n. l. znovuzrození a boom - viz. kapitola 5.1.

Velká čínská zeď se táhla i přes nehostinné oblasti jako je poušť Gobi. Zde lokální zemina neobsahuje dostatečné množství jílu a její charakteristika je spíše štěrkovitá³. Odolnost a trvanlivost byla inteligentně dodána této konstrukci přimícháním místních trvalých hojně se vyskytujících rostlin – tamaryšek, vrby a rákosy, které jsou zvyklé na lokální podmínky (letní pouštní žár a intenzivní chlad v zimě). Kombinací těchto surovin vzniká silný

¹ Používaná zemina je z lokálních zdrojů, většinou bohatá na jíly – tzv. žlutá hlína, těžena minimálně z 10 cm pod povrchem terénu, aby se předešlo obsahu semen a následnému růstu rostlin v tělese zdi.

² Používané bednění je jednoduchá obdoba moderního bednění pro výrobu monolitického betonu.

³ Ve složení štěrkovité zeminy zaujímá značnou část obsahu hrubozrnná složka a její stabilita není ani po zhutnění dostatečná pro vytvoření konstrukce s požadavky na vysokou trvanlivost, pevnost a celkovou odolnost.

a trvanlivý kompozitní stavební materiál. Usychající rostliny vytvářejí vlákna, která fungují jako rozplýlená výztuž a drží šterkovitou konstrukci pohromadě. Pro zvýšení stability zdi jako celku, byl materiál ukládán po vrstvách oddělených vrstvami tenkých větví ve směru kolmém na délku zdi (obr. 8). Dodnes je zachována a k vidění zeď z dynastie Han (206 př. n. l. – 220 n. l.), která je 3,2 m vysoká [1].

Mladší formy zdi už z hlediska geotechniky nejsou tolik zajímavé.



Obrázek 8: Ruiny pouštní části Velké čínské zdi

Zdivo z neopracovaných kamenů kladených na sucho

Kamenné zdi jsou v Číně používány celá milénia. Původní forma byla jednoduchá tedy takzvané suché zdivo – bez malty. Princip byl v kladení neopracovaných, nebo jen hrubě opracovaných kamenů a balvanů z lokálních zdrojů na hromadu. Technika kladení byla taková, že malé kameny byly ukládány aby uzamykaly větší kameny na místě a zeď vypadala pro nepřítele co nejvíce hladká a tedy vysoce odolná. Kvalitně provedená zeď byla velice stabilní a mohla dosahovat výšky až 6 m.

Později byly větší zdi zkonstruovány z vnější strany z hladce opracovaných kamenů, s vnitřní stranou tvořenou z hrubě opracovaných kamenů a jádrem vyplněným přechovanou zeminou nebo kamennou sutí.

Zdivo z pálených cihel nebo kamenných bloků kladených do malty

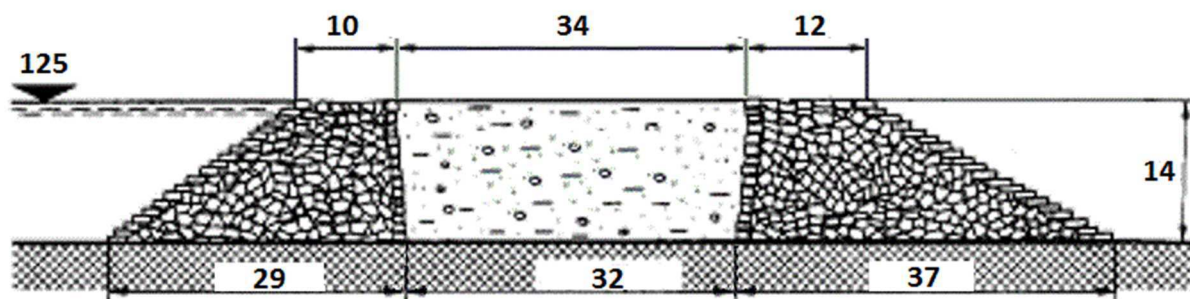
V době kdy vládla dynastie Ming (okolo 14. století n. l.) udělala čínská technologie výstavby značný pokrok a stala se sofistikovanější. Zdi byly stavěny z pálených cihel, velkých

žulových bloků a lokálně těžených kamenů a dosahovaly výšky okolo 7,5 m s šířkou pohybující se mezi 4,5 a 9 m. Cihly byly unifikované, zhruba čtyřnásobně větší, oproti dnešním a byly masově vyráběny sítí pecí. Malta byla vytvořena smícháním jílu, vápna a lepidivé rýže. Tato směs byla pravděpodobně první kompozitní maltou, ve které jsou organické i anorganické přísady [1].

Dolní část zdí, bývala často vystavěna z velkých hladce opracovaných kamenných bloků, přičemž pálené cihly uzavíraly konstrukci z horní části. Tato forma Velké čínské zdi je nejznámější, nejzachovalejší a nejmladší (obr. 5).

3.2 *Sadd el-Kafara*

Tato historicky první přehrada, 30 km jižně od Káhiry v Egyptě, byla na rameni Nilu zbudována za účelem zadržení velkého množství vody pro dělníky blízkých kamenných dolů, zásobujících výstavbu egyptských pyramid a pro zachycení pravidelných záplav v údolí Wadi el-Garawi. Z dnešního pohledu bychom tuto stavbu označili jako sypanou gravitační přehradu⁴.



Obrázek 9: Schematický řez přehradou Sadd el-Kafara

Před dokončením však byla přehrada protrhnuta následkem chyb v konstrukci stavby z hlediska vodohospodářského (konstrukce z hlediska geotechniky – tedy stabilita svahů a uspořádání materiálů byla vzhledem k tehdejším technologiím správná) a nečekaných záplav. Přehrada měla v době protrhnutí v hřebeni délku cca 113 m, tloušťku 56 m a výšku cca 14 m, avšak v podélném směru byl hřeben přehrady mírně vyspádován směrem do středu, což

⁴ Gravitační přehrada přenáší horizontální tlak vyvolaný zadržovanou masou vody pomocí vlastní tíhy materiálu, z kterého je zkonstruována.

znamená, že nejnižší místo přehrady bylo právě v tomto místě. Jádru přehrady mělo v patě šířku cca 32 m a bylo tvořeno sypaným materiálem, tedy vápenatým pískem, šterkem a navětralými kusy kamene, které se v této oblasti hojně vyskytují. Jádru bylo tedy částečně nepropustné. Vzhledem k tomu, že materiál jádra byl navážen z plošiny Wadi, lze předpokládat, že ukládání probíhalo směrem od břehů, do středu přehrady. Z obou stran, po proudu i proti proudu, bylo jádro chráněno kamennými sekcemi, které měly za úkol jádro chránit a podporovat proti sesunutí. Tyto vrstvy byly tvořeny obvykle 30 cm tlustými kameny, které dle barvy a mineralogického složení pochází z dolů v okolí údolí v přímé blízkosti přehrady. Kamenné sekce byly na jádro nahodile naházeny, přičemž mezery mezi jednotlivými balvany nebyly ničím vyplněny [2].

Ochranu těchto kamenných svahů měly zajistit lomové opracované vápencové kvádry, o rozměrech 30/45/80 cm a váze zhruba 300 kg, vyskládané do terasových schodů, 30 cm vysokých, bez použití pojiva (obr. 10). Samotný sklon tělesa přehrady po proudu a proti proudu se lišil, tedy po proudu byl sklon 30° , a na straně přehrady proti proudu byly sklony dva: 43° až 45° v nižší části, a 35° v části vyšší, tedy u hřebene stavby [4].



Obrázek 10: Pohled na zachovalé křídlo přehrady Sadd el-Kafara

Vzhledem k tomu, že se jednalo o první konstrukci svého druhu, nebyli stavitelé obeznámeni s nutností konstrukce bezpečnostního přelivu, popřípadě odvedení přebytečné vody kanálem kolem tělesa přehrady. Přehrada také nebyla opatřena zářezným příkopem v podloží, který by pomohl “zakousnutí” tělesa do koryta řeky a celkové stabilitě (toto však

nebyl faktor, který způsobil, nebo přispěl k protržení nedokončené konstrukce). K protržení, jak již bylo zmíněno, došlo při záplavách, když se voda převalila přes střed tělesa přehrady, tedy přes její nejnižší místo (k čemuž by nedošlo, kdyby byl vytvořen kvalitní bezpečnostní přeliv, nebo boční odvodní kanál). Masa vody valící se přes těleso přehrady začala okamžitě erodovat z horní strany obnažené jádro i s ochrannými vrstvami, což nenávratně vedlo ke kolapsu celé střední části přehrady a vypuštění vzniklé nádrže. Další chybou bylo, že nádrž $570\,000\text{ m}^3$, kterou by kompletní přehrada vytvořila, je nedostatečná pro zachycení místních záplav a proto bylo přelití přehrady nevyhnutelné. Kolaps přehrady pravděpodobně způsobil náhlou záplavu spodní části Wadi el-Garawi. Poté už k výstavbě, ani rekonstrukci nedošlo a tato stavba byla nadobro opuštěna [3].

3.3 *Monks Mound*

Monks mound je velká stavba zemních prací, situovaná v historickém parku Cahokia (kde se nachází dalších minimálně 100 geotechnických staveb podobného typu, ale rozmanitých velikostí), která leží v bývalém záplavovém údolí řeky Mississippi (řeka Mississippi s postupem času měnila svou trasu, zhruba před 1000 lety přestala tolik meandrovat a přesunula se na západ do údolí kde vede mezi strmými vápencovými útesy), na soutoku potoků Cahokia a Canteen.

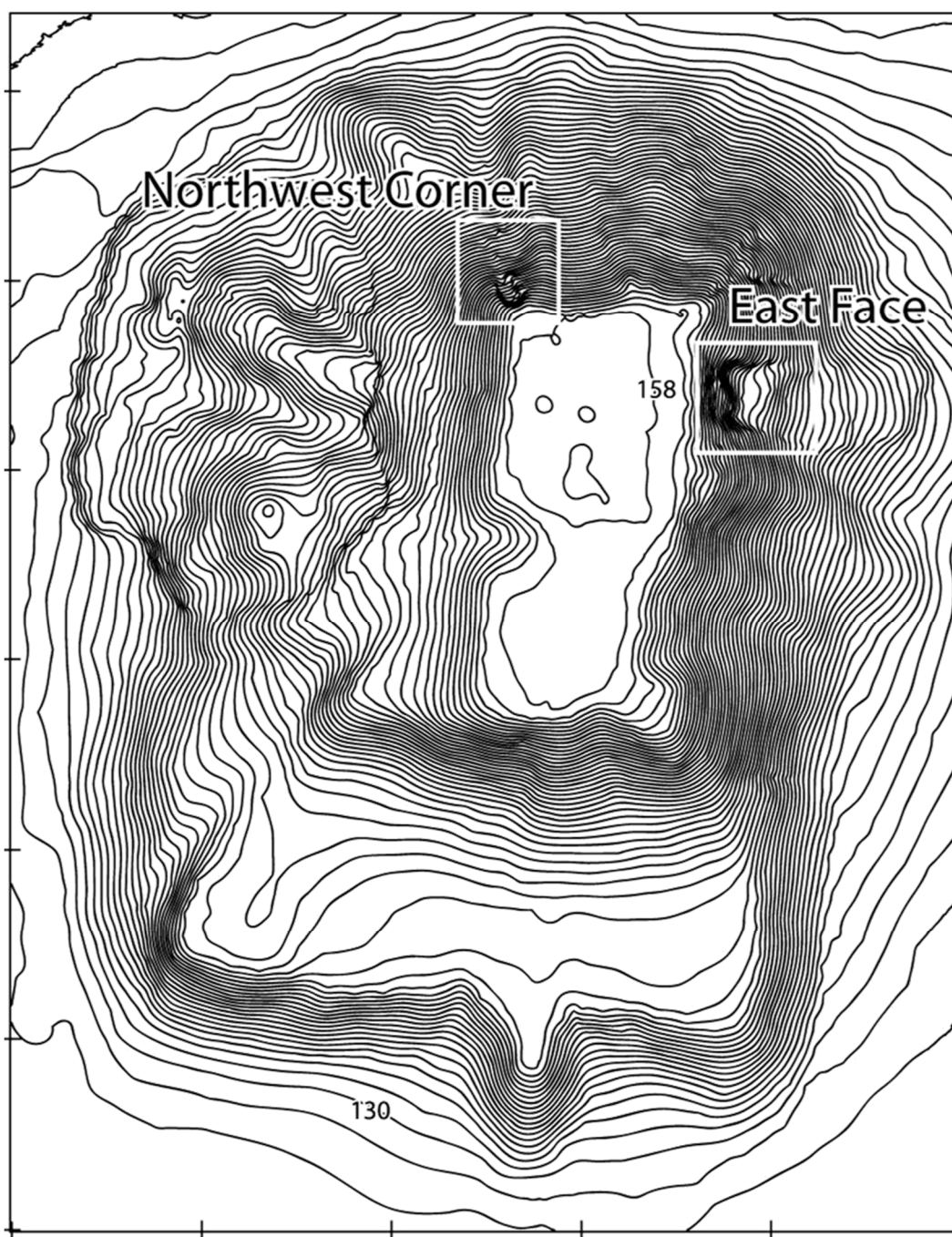


Obrázek 11: Monks Mound v současnosti (pohled na severozápad)

Monks mound je obdélníková sypaná stavba (někdy bývá označována za pyramidu) s plochým vrcholem, na kterém byla postavena série dřevěných dobových domů. Celá konstrukce je vysoká přes 30 m, dlouhá 320 m a široká 294 m a dají se na ní indentifikovat 4 horizontální plochy, často nazývány jako terasy. Dvě terasy (terasa 1 a terasa 3) byly účelově postaveny, aby vynášely ony dřevěné domy, které se však nezachovaly. Terasa 1 směřuje na jih a tyčí se zhruba 12 m nad okolním terénem. Terasa 3 je na sever od terasy 1 a je ve výšce 29 m, přičemž tyto dvě jednotlivé výškové úrovně byly propojeny rampou, nebo schodištěm. Tyto dvě terasy lze identifikovat i laickým okem, ale jsou tu další dvě terasy (terasa 2 a terasa 4), které můžou působit jako jen jako domnělé. Terasa 4 ve skutečnosti zaujímá severní polovinu nejvyšší terasy 3 a je tvořena jílovou vrstvou, která ji zvedá ještě o 1 m výše (ačkoliv terasa 4 je nejvyšší místo Monks Mound, nejsou žádné důkazy o tom, že by podporovala jakoukoliv stavbu, nebo byla místem jiných zvýšených aktivit. Západní část bývala považována jako člověkem zkonstruovaná terasa 2, avšak podle novějších průzkumů se prokázalo, že tato plochá část byla vytvořena velkým sesunutím západního svahu na přelomu 13. a 14. století n. l. [5].

Pro dosažení sklonu svahů 35° byl povrch svahů zaskládán vrstvou travních kobců a drnů, což je lepší řešení, než navršení nezkonsolidovaných sedimentů (nicméně ani toto opatření nezabránilo erozi a svahy se do dnešní podoby zmírnily až na pouhých 28°). Tyto travní drny byly využity i jako jedna z vrstev souvrství stavby.

Potom, co byla stavba opuštěna původní kulturou byla celá konstrukce pokryta stromy a zelení, jejíž kořeny pomáhaly zlepšit stabilitu svahů. Ve dvacátém století výzkumníci porost odstranili kvůli úpravě celého parku. Snížení hladiny podzemní vody v bývalém záplavovém údolí řeky Mississippi v padesátých letech způsobilo proschnutí celého souvrství stavby, což narušilo jílovité vrstvy. Při následujících prudkých deštích v roce 1956 se vyskytly nové sesuvy svahů, které dále pokračovaly v letech 1984 a 1985. Velká trhлина na východní straně byla opravena navezením přebytečné zeminy z jiných staveb. Dekádu poté nastaly další sesuvy na západní straně stavby, ovšem ty byly vyřešeny instalací drenáží pro odvod dešťové vody z tělesa svahu. Opravy v osmdesátých a devadesátých letech se prokázaly jako neúspěšné, protože v letech 2004 a 2005 nastaly ještě silnější sesuvy (obr. 12), které naznačily, že přidávání další, nové zeminy jako oprava východního svahu byla chyba.



Obrázek 12: Topografická mapa s označením sesuvu na východní straně a sesuvu na severozápadním rohu (výškový rozdíl mezi liniemi je 0,5 m)

Následně byl zvolen nový přístup k řešení toho problému – v roce 2007 byl pomocí rypadel odstraněn celý východní sesuv (včetně sesuvu na severozápadním rohu stavby) až pod vzniklou smykovou plochu. Poté byly vytvořeny protismykové “schody” (obr. 13), po celé ploše obnažených svahů, a následně zasypány původní zeminou do původní úrovně (bez zeminy v opravách přidané) [6].



Obrázek 13: Fotografie rekonstrukce východního svahu

Monks Mound byl během posledních oprav podroben podrobnému prozkoumání, jejichž součástí bylo i vyvrtání průzkumných 6,4 cm vrtů (v roce 2005 – 2 vrty, 2007 – 2 vrty a 2008 – 24 vrtů). Analýza těchto vzorků se skládala z měření obsahu fosforečnanů, zkoumání velikostí částic a citlivosti na magnetismus.

Z výsledků výzkumů byly vyvozeny tyto závěry [5]:

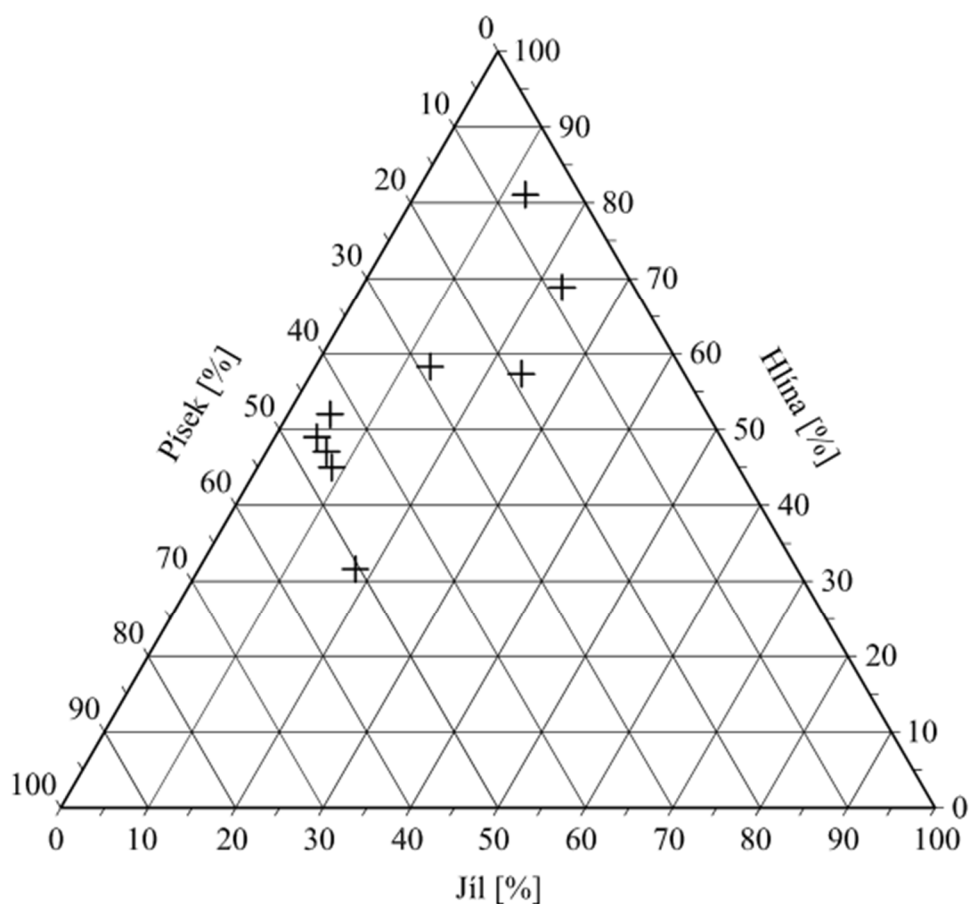
- Bylo zjištěno, že již během konstrukce Monks Mound byla v přímé návaznosti na západní stranu vyhloubena nejméně 2 m hluboká jáma (vzhledem k původnímu terénu), která se zařezávala do sedimentů uložených řekou Mississippi, a byla zaplněna až zerodovaným materiálem z již navršené konstrukce. Tato jáma mohla způsobit, nebo akcelarovat, narušení stability západního svahu, který se od doby konstrukce dodnes sesouvá.

- Lokalita zvolená k výstavbě nebyla ideální volbou, aby zajistila dlouhodobou stabilitu konstrukce, původní (nijak neupravený) terén byl sice ve sklonu zhruba pouze 1%, ale vzhledem k délce celé stavby to vytváří až 2 m vertikálního rozdílu.

- Původní terén nebyl nijak upraven, aby sloužil jako kvalitní základová půda, místní sedimenty nebyly dostatečně zkonsolidovány (byly před stavbou využívány pouze sporadicky) a nejsou dostatečně kvalitním podkladem pro další těžké sedimenty (tab. 1, obr. 14), které zde byly následně navršeny.

Tabulka 1: Výsledky analýzy podloží

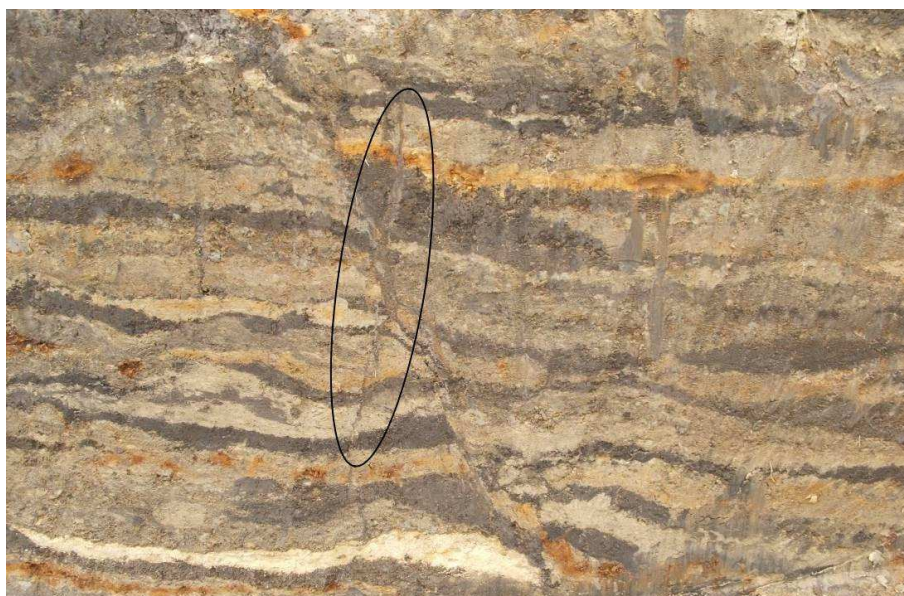
Označení vzorku	Jíl [%]	Hlína [%]	Písek [%]
2008-07-11-01-01	24,0	57,3	18,6
2008-07-11-02-01	13,1	58,3	28,6
2008-07-11-03-01	6,9	47,1	46,1
2008-07-11-04-02	4,8	49,0	46,2
2008-07-15-01-02	4,8	52,0	43,2
2008-07-15-01-03	22,9	68,8	8,2
2008-07-15-02-02	17,9	31,6	50,5
2008-07-15-03-01	12,6	81,1	6,3
2008-07-15-03-02	8,5	45,0	46,5



Obrázek 14: Potrojný graf znázorňující složení sedimentů původního terénu

- Konstrukce nebyla vytvořena takzvanou technikou deka⁵, ale technikou pouze horizontálního vrstvení⁶.

- Materiál, z kterého byla konstrukce vytvořena se po vrstvách mění (obr. 15). Je zastoupeno několik hrubozrnných vrstev, písčitých hlín, a hlín nad jílovým jádrem, vždy se však jedná o sedimenty z blízkých lokalit.



Obrázek 15: Smykové porušení na severozápadním rohu (vyznačen je kořen prorůstající tuto nespojitost)

- Hypotéza, naznačující, že střídání materiálu vrstev byl promyšlený geotechnický záměr, pro odvod dešťové vody, nebo pro zajištění vztlínání podzemní vody do jílového jádra tzn. zamezení vysychání jádra a objemových změn, nebyla potvrzena. Kombinace sedimentů s různou propustností naopak vytváří nestabilitu, protože dešťová voda může prosakovat hluboko do tělesa konstrukce, zde se kumulovat a zhoršovat stav na smykových poruchových plochách.

⁵ Vrstvení materiálu technikou deka znamená, že materiál se ukládá nejen po vrstvách směrem vzhůru, ale také na vzniklých svazích. To znamená, že v počátku výstavby je půdorys stavby mnohem menší, než po dokončení.

⁶ U pouze horizontálního vrstvení je, narozdíl od techniky deka, už od vytvoření první vrstvy materiálu jasně daný výsledný půdorys stavby a následné vrstvení probíhá pouze v horizontálních vrstvách.

3.4 *Lomená pyramida*

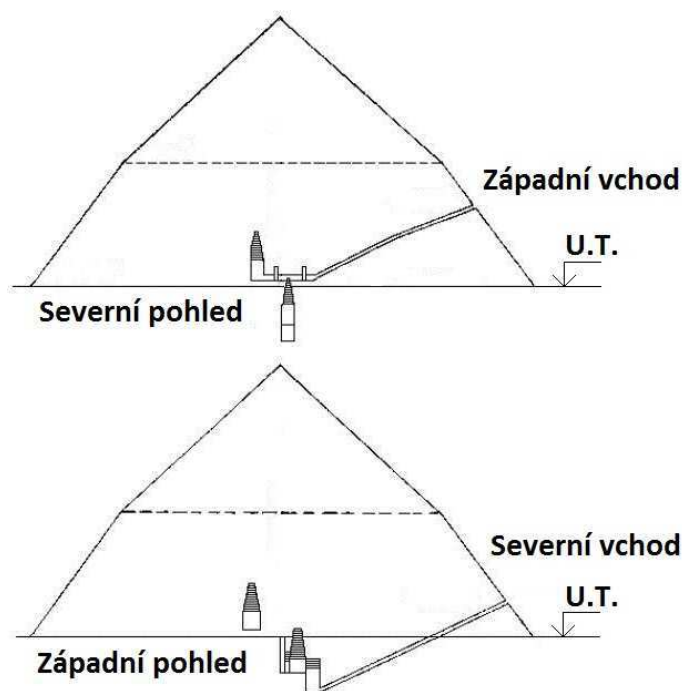
Lomená pyramida, která se nachází asi 3 km západně od vesnice Dahšúr byla původně zamýšlena jako vůbec první pyramida pravá (hladký jehlan, do té doby pouze stupňovité pyramidy). Geometrie stavby však byla v průběhu výstavby změněna a tak dostala tato stavba v Egyptě zcela ojedinělý a unikátní tvar, od kterého se odvíjí i její jméno (obr. 16).



Obrázek 16: Lomená pyramida

Pyramida je postavena z čistě přírodního materiálu - vápencových bloků (ve spodních vrstvách jsou bloky větší, než ty ve vyšších vrstvách) o měrné objemové hmotnosti $2600 - 2900 \text{ kg/m}^3$. Při výstavbě byla použita jednoduchá, avšak efektivní metoda - vrstvy zdiva nebyly kladeny vodorovně, ale skláněly se do středu pyramidy, což výrazně zvyšovalo stabilitu stavby.

V pyramidě jsou vytvořeny dvě pohřební komory, propojené chodbou, přičemž každá z komor má vlastní vstupní chodbu, jedna na západní straně ve výšce 33 m a druhá na straně severní ve výšce 12 m nad povrchem přilehlého terénu. Obě chodby jsou značně sklonité směrem do středu stavby. Chodba se vchodem na severní straně vede až pod úroveň původního terénu, to znamená, že byla vyhloubena v rostlém terénu (obr. 17). Odborníci se v názoru na důvod dvou komor a vstupů rozcházejí. Zajímavé je, že přesně v ose pyramidy je vytvořena svislá šachta. Je tedy nepopíratelný fakt, že v této monumentální stavbě vnitřní prostory skutečně jsou. Důležité však je, že objem, který zaujímají, je pouhých $1/7400$ z celkového objemu stavby.



Obrázek 17: Průběh a rozmístění vnitřních prostor v Lomené pyramidě

Původní záměr byl takový, že pyramida bude mít čtvercovou podstavu o délce strany 173,2 m a sklon pláště 60° (za předpokladu, že se mělo jednat o pravou pyramidu by výsledná výška byla cca 150 m). Avšak narozdíl od egyptského zvyku zakládat monumentální stavby na skálém masívu byla lomená pyramida založena na hlinito-šterkovitém podloží což se prokázalo jako chyba. Když stavba dosáhla výšky cca 30 m projevila se nedostatečná únosnost podloží, což vedlo k nerovnoměrnému sedání celé konstrukce. Nerovnoměrné sedání stavby se projevilo jako zvětšování mezer mezi vápencovými bloky a lokální trhliny [10].

Ze strachu z destrukce celé konstrukce byly přijaty opatření, které snížily tlak na slabé podloží. Čtvercová podstava byla zvětšena na délku strany 189,4 m a sklon již hotové části stavby byl snížen na 54° . Avšak ani toto nepomohlo a když stavba dosáhla výšky přibližně 47 m došlo k další redukci úhlu na pouhých 43° , což snížilo výšku stavby na 104,7 m a drasticky celou konstrukci oproti původnímu plánu odlehčilo [10].

Pro úplnost je třeba dodat, že byly vysloveny také jiné domněnky, podle nichž neobvyklý tvar pyramidy není výsledkem snahy zajistit statickou stabilitu konstrukce, ale původním stavebním záměrem motivovaným náboženskými nebo politickými důvody (kupříkladu rozdílné sklony měly symbolizovat jednotu Horního a Dolního Egypta [11]).

4 Poučení současným a budoucím geotechnickým stavbám

Z rozboru jednotlivých staveb výše vychází jednoduché poučení. Stavby větších proporcí nelze provádět bez pokročilé znalosti vlastností materiálu z kterého stavbu provádíme, včetně znalosti chování materiálu ve “vyjíměčných” podmínkách, jako může být například proschnutí, zavodnění, nebo během zemětřesení v lokalitách k zemětřesení náchylným. Důležité je nejen znát veškeré materiály jednotlivě, ale uvědomit si, jak budou jednotlivé materiály vzájemně fungovat a spolupracovat (například při neodborném vrstvení materiálů s různou permeabilitou může docházet k nechtěnému kumulování podzemní vody).

Další důležité informace, se kterými musíme pracovat a pečlivě je vyhodnotit, jsou vlastnosti podloží, na kterém plánujeme stavbu zhotovit, popřípadě chování podloží po přetížení. V případě neodborného provedení, popřípadě podcenění důležitosti znalostí okolností, jako je podloží, mohou nastat vážné potíže, vedoucí k nákladným rekonstrukcím, sanacím, nebo dodatečným upravám okolí, či celého konceptu konstrukce.

Jako poruchové stavby, lze mimo výše zmíněné Monks Mound, Lomenou pyramidu a přehradu Sadd el-Kafara lze uvést například případ notoricky známou šikmou věž v Pise v Itálii, při jejímž návrhu, jako u Lomené pyramidy, byla přeceněna únosnost podloží, popřípadě podceněn průzkum podloží s následným návrhem základů. Doba výstavby věže se tak značně prodloužila, projekt věže musel být průběžně upravován a následná cena dodatečných opatření (odsávání měkkého jílovitého podloží z pod vyšší strany věže atd.) se v případě šikmé věže vyšplhala na 25 milionů dolarů. Příklad přehrady Teton v Idaho, USA, kde bylo hrubě podceněno provedení konstrukce, ukazuje, že u nekvalitně provedených vodohospodářských staveb nehrozí jen astronomické materiální škody, ale také škody na životech, protože při protržení přehrady a následných záplavách přišlo o život 11 lidí a škody byly vyčísleny na cca 1 miliardu dolarů.

5 Příklady analogických minulých a současných staveb

Je podstatné uvědomit si, že naši předkové nebyli hloupí a značné množství technologií dnes používaných, existuje již dlouhou dobu a v současnosti je pouze vylepšujeme, například použitím nových trvanlivějších a obecně po všech stránkách výhodnějších materiálů, nebo zavedením mechanizace a automatizace do výroby. V minulosti byl přístup k výstavbě do značné míry empirický, takže se zjednodušeně stavby zvyšovaly a zvětšovaly do té doby, dokud nedošlo k vyčerpání maximálních možností použitých materiálů a daná stavba se zhroutila. Z takové události se stavitelé poučili, dále tuto hranici nepřekračovali a stavěli ověřeným způsobem. V této kapitole jsou uvedeny dvojice analogických staveb, které jsou si konstrukčně, nebo technologicky podobné. Také se zaměřuji na inovaci, kterou technologie podstoupila, a tedy jak se v případě konkrétního případu novodobé stavby prováděla.

5.1 *Pěchování zeminy: Velká čínská zeď – Nk'Mip pouštní kulturní centrum*

Nk'Mip postavené v Kanadě roku 2006 n. l., je novodobá stavba, při jejíž výstavbě bylo, stejně jako při výstavbě rané formy Velké čínské zdi, využito techniky pěchování zeminy. Tyto dvě stavby s analogickou technologií výstavby však dělí přes dvě a půl milénia, což znamená, že technologie byla značně modernizována (stejně tak i přístup k volbě zeminy jako stavebního materiálu), nicméně princip, tedy plnění dočasného bednění zeminou po vrstvách s následným pěchováním, zůstal zachován. Budova Nk'Mip je zabudována částečně do podzemí, přičemž její nadzemní část je zakryta zelenou střechou. Dominantou budovy je však 80 m dlouhá, 5,5 m vysoká a 0,6 m tlustá zeď z pěchované zeminy s izolačním jádrem (což je největší konstrukce tohoto typu v Severní Americe).

Zeď je tvořena dvěmi, 100 mm tlustou izolací oddělenými, zeminovými vrstvami (pro jejichž zhotovení byl materiál těžen z lokálních zdrojů). Tato masivní 0,6 m tlustá zeď poskytuje dostatečnou tepelnou kapacitu (přes horký den se konstrukce nahřívá a absorbuje přebytečné teplo, které poté v chladné noci vyzáří) a tepelnou izolaci, proti extrémním teplotním výkyvům v okolní poušti, které se pohybují od + 40 °C až k – 18 °C.

Moderní přístup k této technologii, od volby, jestli je lokální zemina pro stavbu vhodná, či nikoliv, přes přípravné operace až k finálnímu udusání zeminy v dočasném bednění je popsán níže.



Obrázek 18: Pohled na Nk'Mip pouštní kulturní centrum

Volba vhodnosti materiálu

V ideální situaci je dostatečné množství ideálně vhodné zeminy pro konstrukci stavby z pěchované zeminy natěženo z výkopu připraveného pro zřízení základů, podzemní části stavby, ostatních zemních prací a/nebo vhodné jámy na staveništi. Ideální zemina nebude potřebovat žádnou další úpravu složení a bude mít vhodnou vlhkost pro zvolenou metodu kompakce. Není žádným překvapením, že tato situace je spíše vyjímečným případem, než pravidlem pro konstrukci staveb z pěchované zeminy, a proto se často musí zemina upravit před jejím použitím. Vlastnosti důležité pro určení vhodnosti zeminy jako stavebního materiálu jsou [9]:

Zastoupení velikostních frakcí: analýza zeminy proséváním a sedimentační zkouškou se stala běžnou součástí kontroly vhodnosti zeminy pro použití na výrobu konstrukcí z pěchované zeminy. Některé zdroje uvádí, že vliv velikostí jednotlivých frakcí na charakteristiky jako je pevnost a trvanlivost zatím zůstává nejasný [7], jiné však uvádí, že ideálním obsahem jednotlivých frakcí je 32% (0,06 – 0,002 mm) hlíny, 30% (2 – 0,06 mm) písku, 23% (60 – 2 mm) štěrku nebo hrubého kameniva a 15% (< 0,002 mm) jílu [8]. Jiné studie uvádí, že ideální stav je, když ve směsi je vysoký obsah písku nebo jemného štěrku, malý podíl hlín a jen tolik jílu, aby se zajistilo spojení ostatních částic, popřípadě aby frakce štěrku hrubšího než 5 – 10 mm byla proséváním úplně odstraněna [9]. Je důležité podotknout, že nadměrně velká zrna ve směsi zvyšují možnost vzniku hluchých míst, kde se menší zrna při kompakci nedostaly. To může být velký problém hlavně u rohů a hran konstrukce. Organická hmota by neměla být součástí směsi, protože může způsobovat smrštění výsledné konstrukce a možné biologické znehodnocení, jakožto i rostoucí náchylnost k napadení hmyzem. Organický materiál také může narušovat funkci stabilizátorů jako je cement (v případě stabilizovaných konstrukcí).

Barva: zemina v přírodě má velký rozsah barev od červené, žluté, hnědé, šedé, zelené, až po modrou, bílou a černou. Červená barva je většinou preferována. Přírodní barva může být upravena přidáním přísad jako je vápno a cement, nebo mísením různých zemin. Variace barev jednotlivých vrstev vede k vrstevnatému vzhledu, což je z estetických důvodů ve většině případů žádáno (obr. 19).



Obrázek 19: Různobarevnost jednotlivých vrstev zdi Nk'Mip

Plasticita⁷: Index plasticity je rozdíl mezi vlhkostí na mezi tekutosti (zjištěné například penetrační kuželovou zkouškou) a vlhkostí na mezi plasticity (zjištěné příslušnou zkouškou dle ČSN721007). Vlhkost na mezi tekutosti pro nestabilizované zeminy by se měla pohybovat mezi 20 a 50% (nejlépe 30 a 35%) a vlhkost na mezi plasticity mezi 10 a 25% (nejlépe 12 a 22%). Vyšší index plasticity nám říká, že je obsaženo více jílové složky a během vysychání nastane větší smrštění, které vede k nechtěným trhlinám.

Vlhkost: pro dosažení maximální objemové hmotnosti (kvalitního zkompaktnění směsi) v suchém stavu, což je velmi důležitý faktor z hlediska pevnosti, je nutné, aby vlhkost směsi při kompakci byla optimální a napomohla samotnému procesu kompakce. Obě zkoušky, Proctor standard a Proctor modifikovaný, se běžně používají ke stanovení této optimální vlhkosti a maximální objemové vlhkosti v suchém stavu.

⁷ Plasticita je schopnost zeminy podstoupit nevratnou deformaci a zároveň odolávat zvýšení zatížení, jež je indikována indexem plasticity.

Pevnost: základní pevnosti pro konstrukci důležité, jako je pevnost v tlaku, pevnost v tahu a ohybová pevnost jsou zjišťovány pomocí jak terénních, tak laboratorních zkoušek, velmi podobných, či identických, zkouškám pro beton.

Trvanlivost: trvanlivost v kontextu konstrukcí tvořených zeminou znamená schopnost konstrukce odolávat destruktivnímu působení povětrnostních podmínek bez následku degradace v rámci odhadované doby funkce konstrukce. Odolnost proti eroznímu působení dešťových kapek se ověřuje laboratorními zkouškami a to buď zkouškou padajících kapek, nebo zkouškou stříkací. V případě stabilizovaných konstrukcí se přidává zkouška založená na opakovaných cyklech zvlhčení a vysušení konstrukce, ale také odolnost proti opakovanému zmražení a rozmražení.

Pracovní operace

Homogenita zeminy je důležitá u těchto konstrukcí z důvodu strukturální integrity, ale také z důvodu architektonického vzhledu. Je tedy jasné, že po vytěžení zeminy a před jejím vysypáním do bednění, musí být zpracována a upravena. Tyto předběžné úpravy se mění podle typu zeminy, s kterou pracujeme, ale obecně se používají výkop, prosévání a mísení [9].

Výkop: zemina pro konstrukce z ubíjené zeminy by neměla obsahovat významný podíl organické hmoty. Ornice by tedy měla být odstraněna a uložena pro budoucí využití. Rozsah ornice je obvykle indikován změnou barvy a typicky zahrnuje svrchní porost včetně 25 – 50 mm zeminy. Pro tuto fázi se využívají buldozery, angledožery a scrapery.

Prosévání: není neobvyklé, když se štěrky hrubší než 10 – 20 mm ze směsi odstraňuje. Běžně se používají statické nebo vibrační síta.

Rozmělnění: důvodem rozmělnění je rozbití soudržných částí zeminy na jednotlivá zrna. Neprovádí se ovšem pokaždé, ale spíše pro suché jílovité půdy, které obsahují tvrdé hrudky, jež potřebují rozbít, aby se mohl jíl efektivně promíchat s pískem a dalšími složkami směsi před navlhčením, mísením a přechováním. Rozmělnění je nejvíce efektivní, když se provádí na suché zemině a lze jednoduše dosáhnout průchodem pneumatického pěchu přes zeminu před mísením.

Uložení zeminy: zemina by vždy měla být přechována při své optimální vlhkosti, v návaznosti na zvolenou techniku kompakce. Korekce vlhkosti zeminy během nepříznivého počasí je tedy důležitým aspektem během organizace prací. Měly by být přijaty opatření, aby

nedošlo k nadměrnému zvlhnutí uložené zeminy, popřípadě aby bylo zemině umožněno volně prosychat během suchých období, pokud je snížení vlhkosti potřeba.

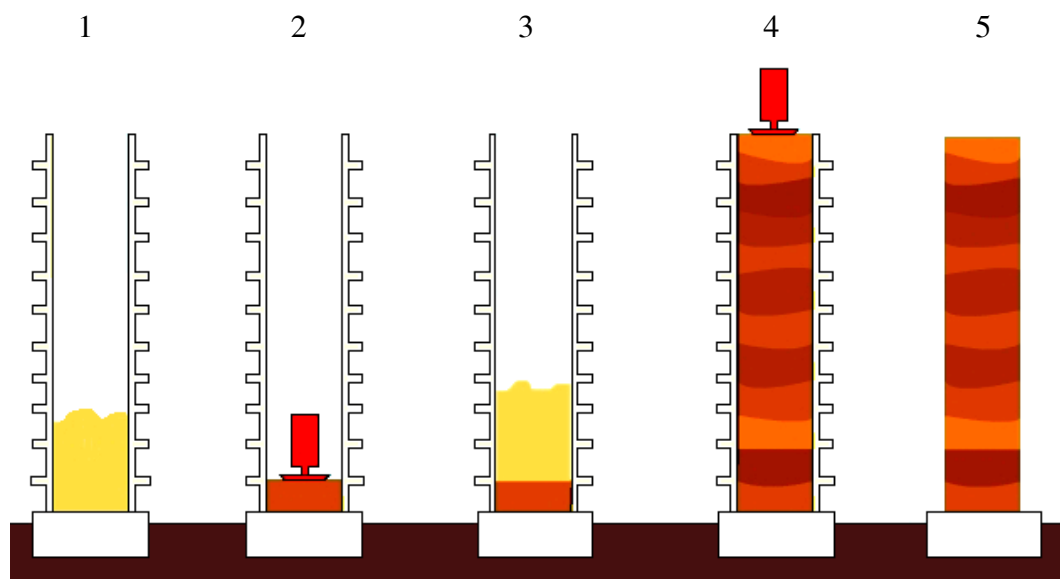
Mísení: mísení je nejdůležitější součástí, která zajišťuje homogenitu použité zeminy a také rovnoměrné rozprostření vlhkosti po celé směsi. Aby byly dosaženy optimální výsledky je ideální, aby prosévání, rozmělnění a mísení probíhalo v jednom kontinuálním procesu. Je několik možných způsobů mísení, běžně jsou využívány míchačky s rotačním bubnem na beton či maltu (obzvláště účinné na směsi s vysokým obsahem písku a šterku), což může být velmi zdoluhavý proces. Lze také využít míchačky s nuceným mísením, nebo Bobcat s míchací lžící.

Stavba bednění: bednění funguje jako dočasná podpora během kompakce zeminy. Stejně jako u bednění pro monolitický beton musí být bednění dostatečně pevné, tuhé a stabilní, aby dokázalo odolávat tlakům, kterým je vystaveno při výstavbě. Narozdíl od bednění pro monolitický beton, může být bednění odstraněno prakticky okamžitě po kompakci zeminy, což znamená, že může být rychleji znovu použito. Volba vhodného bednění je důležitá, protože doba potřebná k jeho sestavení, vyrovnaní a rozebrání je větší než transport a udusání zeminy. Je jasné, že zdi z pěchované zeminy musí být realizovány na důkladně zhotovených základech. Pro tuto technologii se používají klasické pásové železobetonové základy, stejné jako při výstavbě objektu z konvenčních materiálů. Ze základů bývá vytažena betonářská vertikální výztuž, která dále prochází celým souvrstvím zdi.



Obrázek 20: Postup posuvného bednění

Pěchování zeminy: do bednění je nasypána připravená zemina o ideální vlhkosti a o vrstvě odpovídající zvolenému způsobu kompakce (většinou však cca 15 cm), poté už následuje upěchování (obr. 21 a 22).



Obrázek 21: Znázornění pracovního postupu pěchování

- 1: Bednění postaveno na kvalitních základech, první vrstva připravené směsi nasypána.
- 2: První vrstva směsi upěchována.
- 3: Druhá vrstva směsi nasypána na první, následuje upěchování.
- 4: Stejný postup se opakuje až do požadované výšky.
- 5: Demontáž bednění.



Obrázek 22: Práce s pneumatickým pěchem

V minulosti byla kompakce prováděna ručně - viz. kapitola 3.1, avšak v současnosti se využívá pneumatických pěchů, které dokážou tento proces zkrátit minimálně na polovinu. Pneumatické pěchy pracují se stlačeným vzduchem, který opakovaně zvedá a spouští úderný kruhový pěch o průměru 70 – 150 mm (se štíhlým nástavcem pro kompakci rohů a koutů). Vhodné pěchy jsou s dlouhou údernou vzdáleností, mírnou rychlostí a hmotností, protože práce a manipulace s nimi je jednoduchá i ve vyšších výškách. Vysokorychlostní benzinové kladiva nejsou vhodná. Po zhutnění jednotlivé vrstvy, se doporučuje uhlazený povrch mírně rozvolnit poškrábáním, pro zlepšení spojení jednotlivých vrstev a snížení náchylnosti k delaminaci – tedy oddělení jednotlivých vrstev [9].

Stabilizace

Použití stabilizátorů, jako je cement, je často zapříčiněno potřebou zvýšit pevnost za vlhka a odolnost proti erozi u velmi exponovaných konstrukcí v územích s pro tuto technologii nevhodným podnebím. Přidávání cementu do směsi pro ubíjenou zeminu se stává běžnou praxí, nicméně tomu se dá předejít kvalitním návrhem konstrukce jako celku [9].

Pro optimální výsledky z přidání stabilizátoru musí zemina splňovat konkrétní požadavky. Zemina musí být naprosto bez organické složky (včetně travních zbytků), a její složení má být především zastoupeno pískem a jemným šterkem s minimálním obsahem jílu a hlíny, která zde funguje jako filler. Jako stabilizátory se používají portlandský cement (v drtivé většině), vápno, přírodní vlákna, živice a chemické roztoky, jako jsou silikáty.

Stabilizace cementem: přidání cementu do směsi přináší řadu výhod. Směs získává pevnost vytvořením cementové matrice, která váže dohromady půdní částice. Vysoký obsah cementu zvyšuje povrchovou odolnost, snižuje náchylnost k erozi a výrazně zvyšuje odolnost proti mrazu.

Avšak přidání cementu má i své nevýhody. Snižuje se propustnost, což znamená, že přirozená schopnost průchodu vlhkosti přes hmotu půdy je výrazně snížena. Dopad na životní prostředí způsobený výrobou cementu (u staveb, kde je snaha, aby byly postaveny z plně přírodních materiálů) a snížená možnost recyklace cementem stabilizované zeminy jsou časté argumenty proti řízení cementu. Tepelná vodivost se mírně zvyšuje.

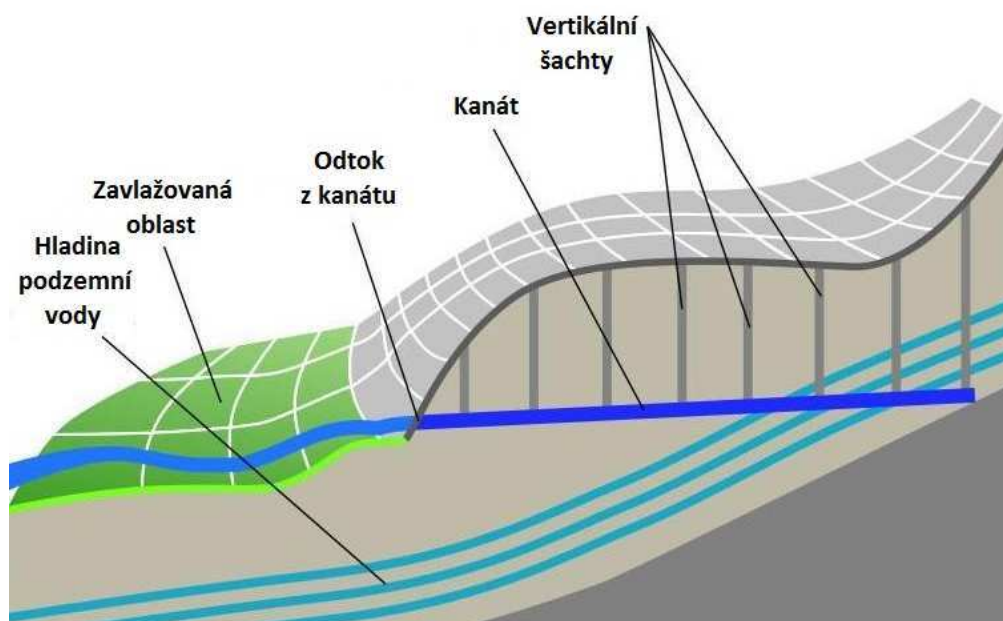
Cement se do směsi přidává většinou v rozmezí 4 a 15% (nejvíce pak mezi 6 a 10%) hmotnosti směsi. Zvyšování obsahu cementu přináší zvýšení pevnosti a odolnosti proti erozi. Minimální obsah cementu se odvíjí od složení zeminy. Přítomnost jílu ve směsi v podstatě

překáží plné účinnosti cementu, což znamená, že obsah jílu musí být co nejnižší tedy i nízký index plasticity. Technologie se mění jen minimálně – mísení, při kterém se přidává cement probíhá těsně před finálním nasypáním do bednění.

5.2 Akvadukty: Gadarský akvadukt – Thirlmerský Akvadukt

Gadarský akvadukt

Gadarský akvadukt, známý též pod názvem Kanál Faraonů, je starověký kanát⁸, který byl postaven za účelem zásobování Decapolisu⁹. Ačkoliv název Kanál Faraonů naznačuje, že se jedná o egyptskou stavbu, ve skutečnosti je tento podzemní tunel stavbou římskou a je důkazem neuvěřitelných schopností jeho stavitelů. Celková délka 170 km dělá z Gadarského akvaduktu nejdelší starověkou stavbu podobného typu vůbec [12].



Obrázek 23: Princip funkce kanátu

⁸ Kanát je důmyslná podzemní stavba se sérií vertikálních přístupných šachet, která pomocí velice mírného spádu přivádí vodu z horských zvodní do oblasti, kde je voda spotřebována. Značné množství kanátů se nachází na území Íránu a ve vyprahlých zemích Asie a Severní Afriky.

⁹ Decapolis byla skupina deseti měst na východním území římského impéria, která byla domovem pro více než 50 000 lidí. Z pohledu dnešního politického rozložení šlo o území Jordánska a Sýrie.

Tento kanát byl znovuobjeven profesorem hydromechaniky Mathiasem Doringem z Darmstadtu v Německu, v roce 2004. Celý systém akvaduktu se skládá z 64 km po povrchu vedeného kanálu, který se dále ztrácí v oddělených tunelech, z kterých nejdelší měří 94 km. Průzkum ukázal, že tunel byl ražen na výšku okolo 2,5 m a šířku 1,5 m. Výsledný přítok vody, který tato stavba poskytovala, byl přes 500 litrů na člověka denně a průtok zhruba 300 až 700 litrů za vteřinu [12].



Obrázek 24: Pohled dovnitř Gadarského akvaduktu

Obrovská výstavba začala okolo roku 90 n.l. a trvala dalších 120 let, přičemž bylo ručně odtěženo přes 600 000 m³ vápence. Počáteční fáze projektu na území Sýrie byl povrchový kanál, který byl ručně vykopán a vyložen žlabem z římského betonu¹⁰, jehož výstavba probíhala velice rychle. Tento kanál byl pokryt deskami, z důvodu ochrany protékající vody před znečištěním, ale také před světlem, což znemožňovalo růst řas. Avšak poté, co se stavitelé dostali do hornaté oblasti severního Jordánu, museli čelit velkým potížím, protože tamější území pokrývají řetězce hor s plochými vrcholky obklopené strmými roklemi. Prvním takovým problémem byla 200 m hluboká propast Wadi al-Shalal. Nejjednodušším i prvním řešením, které stavitelé vyzkoušeli, bylo tuto propast obejít, ale členitý a obtížný terén

¹⁰ Římský beton známý též pod názvem “opus caementicium” tvořený směsí drceného kamene nebo štěrku a malty dosahoval pevností okolo 40 MPa. Tj. pevnost srovnatelná s pevností dnešních betonů.

takovou variantu brzy znemožnil. Proto stavitelé zvolili podzemní kanál, který procházel skalnatou stěnou hory v délce 11 km a následně průrvu v neuzším místě překonali přemostěním. Po překonání této, první, překážky však přišla další zdánlivě nekonečná řada kopců a strmých svahů. Stavitelé se tedy rozhodli zbytek stavby vést v podzemí. S touto technologií v tak obrovském měřítku však nastaly nové problémy [12]:

- v době výstavby nebyl vynalezen ještě vynalezen kompas, navigace směru by tedy byla na dlouhé vzdálenosti v podzemí velmi obtížná,

- na čelbě o výšce 2,5 m a šířce 1,5 m mohou najednou pracovat pouze 4 legionáři s denním postupem cca 10 cm, ražba pomocí jediné čelby by trvala příliš dlouhou dobu¹¹

- je velice obtížné, spíše nemožné, zajistit adekvátní ventilaci pro pracovníky.

Řešením byl výběr trasy na povrchu terénu a následné vytvoření množství šikmých sestupných šachet¹² každých 20 až 200 m, z kterých poté po částech probíhala výstavba samotného kanátu. Tato technologie zajišťuje dostatečný přísun čerstvého vzduchu, a také vytváří možnost pro současnou práci na více jednotlivých čelbách najednou, takže je výsledný denní postup mnohem větší. Samotná těžba byla prováděna pouze ručně, avšak čelba byla horizontálně rozdělena, opět pro zvýšení efektivity práce.

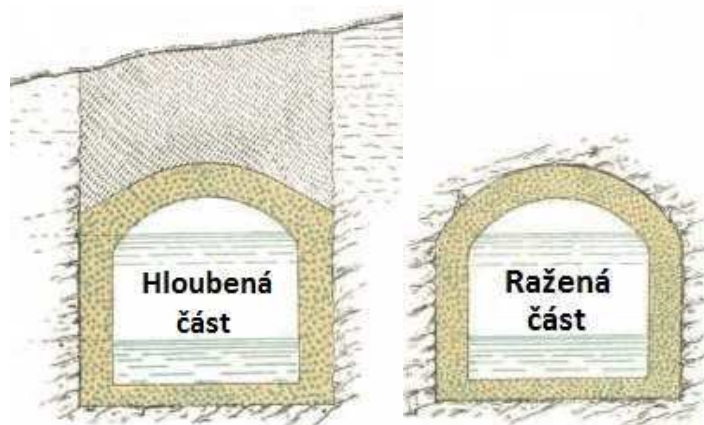
I přes vysoce obtížné podmínky se podařilo dosáhnout stavitelům spádu 30 cm/km, což je překvapivě malý sklon [13]. Nicméně k chybám při výstavbě docházelo také, což u takové stavby, v kontextu data výstavby, vůbec není překvapivé. Čas od času se razící čety minuly a řešením bylo zig-zag ražení, dokud se legionáři v podzemí nepotkali [12]. Navzdory obrovskému vynaloženému úsilí při výstavbě tohoto kanátu, zavládlo v po dokončení v Gadaře velké zklamání. Důvodem bylo očekávání, že kanát bude schopen plnit obrovský kamenný rezervoár pro pohánění množství okázalých městských fontán. Toho se však docílit nepodařilo a voda po cca 170 km dorazila do Gadary pomaleji, než se očekávalo [13].

¹¹ Předpokládáme, že stavba začala v roce 90 n.l., denní postup na jedné jediné čelbě byl 10 cm a pracovalo se 365 dní v roce na 94 km dlouhé části akvaduktu. Poté by dokončení této části bylo okolo roku 2665.

¹² Sestupné šachty byly po dokončení stavby zazděny, aby nedocházelo ke znečištění vody zvěří a nežádoucímu zanesení kanátu nečistotami.

Thirlmerský akvadukt

Thirlmerský akvadukt byl vybudován mezi lety 1890 a 1925 za účelem napájení vodou britského města Manchester. Tento akvadukt čerpá vodu z uměle vytvořeného thirlmerského rezervoáru. Technikou stavby bylo střídání hloubené konstrukce (výška nadloží se pohybuje okolo 0,9 m) a klasické ražby, přičemž profil akvaduktu je zachován stále stejný – podkovovitý (obr. 25).



Obrázek 25: Schematický řez hloubenou a raženou částí akvaduktu.

Celková délka akvaduktu je cca 152 km a zásobuje vodou okolo 800 000 lidí. Průtok se pohybuje okolo 255 milionů litrů vody denně. Rozměry profilu se po délce stavby nijak výrazně nemění, šířka se pohybuje okolo 2,2 m a výška kolísá od 2,2 m do 2,4 m a tloušťka betonového ostění je 0,3 m. Části ražené ve skále na sever od města Kendal byly ponechány bez betonového ostění a stropu, ochrana počvy betonem však zde byla zachována. Pro překonání překážek jako jsou koryta řek byly použity litinová, později ocelová, potrubí. Celý systém akvaduktu funguje samotížně, takže nejsou použity žádné čerpadla, nebo pumpy. To zajišťuje spád 30 cm/km [14].



Obrázek 26: Pravidelná revize thirlmerského akvaduktu

V současnosti existují a svou funkci plní na světě mnohem delší akvadukty, než je thirlmerský akvadukt, nebo akvadukt gadarský. Nejdelší podobnou geotechnickou stavbou je akvadukt Delaware, který zásobuje vodou město New York, USA, jehož celková délka je 137 km, je tedy nejdelším tunelem na světě. Tento akvadukt je jako thirlmerský akvadukt z části ražen a z části hlouben. Nejdelším akvaduktem vůbec, bez ohledu na technologii, je kalifornský akvadukt o celkové délce 1 129 km. U této stavby se prolíná více technologií, ať už potrubní vedení přes hornatý terén, umělý betonový kanál na rovinnatých územích, nebo i kratší ražené pasáže.

6 Závěr

Hlavním úkol této bakalářské práce, dokázat, že analýza zachovalých geotechnických monumentálních staveb je vhodným a plnohodnotným podkladem pro návrh nových staveb, se podařil splnit. Taková analýza vede k opakování vhodných, dlouhou dobu osvědčených postupů a může vést k vyvarování se chyb již v minulosti provedených. Zachovalé stavby samotné pak slouží jako příklad a důkaz úspěšné technologie, i úspěšného provedení této technologie, popřípadě jako reálná ukázka provedených chyb a následků těchto chyb v životním měřítku. Nejen samotné konstrukční provedení dané stavby svědčí o úspěšnosti návrhu a provedení, ale také jednotlivé opravy a rekonstrukce na stavbě provedené mohou sloužit jako podklad pro návrh opravy a rekonstrukce provedené na stavbách nových. I v tomto případě okamžitě vidíme, zdali byl zvolený přístup pro řešení daného problému vhodný, nebo ne, a to hlavně z pohledu dlouhodobého, což je velmi důležité.

Získané poznatky z historických geotechnických staveb mohou být uplatněny jako cenný zdroj vstupních dat, prověřených a stvrzených mnoha staletími, výpočtových modelů analogických současných a budoucích geotechnických staveb.

8 Seznam použitých pramenů

- [1] **TURNBUL, Stephen.** *The Great Wall of China 221 BC-AD 1644*. Osprey Publishing Limited. 2007. ISBN 978 1 84603 004 B.
- [2] **MAYS, W. Larry.** *Ancient Water Technologies*. Springer Science+Business Media B.V.. 2010. ISBN 978-90-481-8631-8.
- [3] **JANSEN, B. Robert.** *Dams from beginning*. U.S. Department of the Interior, Bureau of Reclamation (1980). < <http://ussdams.com/ussdeducation/Media/damsfrombeginning.pdf>>.
- [4] **KUMAR, S., SHANKER, K., DEY, A.** *Failure analysis of th Sadd-El-Kafara: The Oldest Masonry Dam*. Proceedings of Indian Geotechnical Conference. 2014.
- [5] **SCHILLING, Timothy.** *Building Monks Mound, Cahokia, Illinois, A.D. 800-1400*. The glenn A. Black Laboratory of Archaeology. Bloomington, Indiana, 2012.
- [6] **SCHILLING, Timothy.** *An Archaeological Model of the Construction of Monks Mound and Implications for the Development of the Cahokian Society (800-1400 A.D.)*. Washington University in St. Louis, 2010.
- [7] **KEABLE, J.** *Rammed Earth Standards. ODA Final Project Report R 4864C*. 1994.
- [8] **PELLETT, Christina.** *Building with Earth*. Canadian Builders Quarterly: September, October, 2010.
- [9] **MANIATIDIS, Vasilios, WALKER, Peter.** *A Review of Rammed Earth Construction*. Department of Architecture & Civil Engineering. University of Bath, 2003.
- [10] **VERNER, Miroslav.** *Pyramidy*. Nakladatelství Academia Středisko společných činností AV ČR, v. v. i., 2008. ISBN 8020016171.
- [11] **HITCHINS, Derek.** *The Secret Diaries of Hemiunu, Architect of the Great Pyramid*. Lulu.com, 2010. ISBN 978-1-4457-4824-5.
- [12] **SCHULZ, Matthias.** *Rome's Tremendous Tunnel: The Ancient World's Longest Underground Aqueduct*. Spiegel Online International, 2009.
<<http://www.spiegel.de/international/world/rome-s-tremendous-tunnel-the-ancient-world-s-longest-underground-aqueduct-a-612718.html>>.
- [13] **HEGGEN, J. Richard.** *Underground Rivers from the River Styx to the Rio San Buenaventura with occasional diversions*. University of New Mexico, 1992.
- [14] **NEIL, Pete.** *Thirlmere Aqueduct Construction Facts, The Hodder and Thirlmere Aqueduct Access Gates: Compiled & Researched by the Nutters Mobile Surveillance Unit*. 2010. < <http://www.jdscomponents.co.uk/gates/thirlmere/facts.asp>>.

- [15] **HENKEL, Marlon.** *21st Century Homestead: Suitanable Agriculture II: Farming and Natural Resources*. Lulu.com, 2015. ISBN 978-1-3129-3968-4.

Poděkování

Rád bych poděkoval doc. Ing. Karlu Vojtasíkovi, CSc. za cenné rady, věcné připomínky a vstřícnost při konzultacích a vypracování bakalářské práce.